บทที่ 3

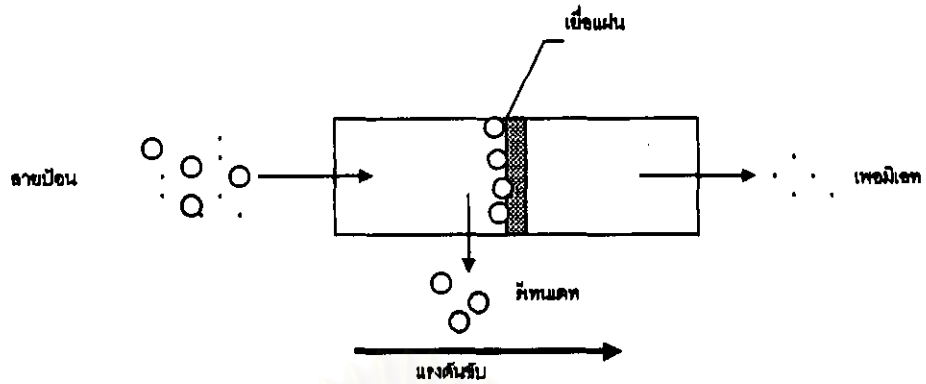
ทฤษฎีเกี่ยวกับการกรองระดับอนุภาค

กระบวนการแยกสารออกจากของเหลวโดยอาศัยแรงดันเป็นตัวขับ สามารถแบ่งได้ 3 ระดับตามขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นที่เลือกใช้ ได้แก่ การกรองระดับอนุภาค (Microfiltration), การกรองระดับโมเลกุล (Ultrafiltration) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) (รูปที่ 3.1)

รูปที่ 3.1 ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการกรอง

3.1 <u>กระบวนการกรองผ่านเยื่อแผ่น</u> (Membrane Filtration)

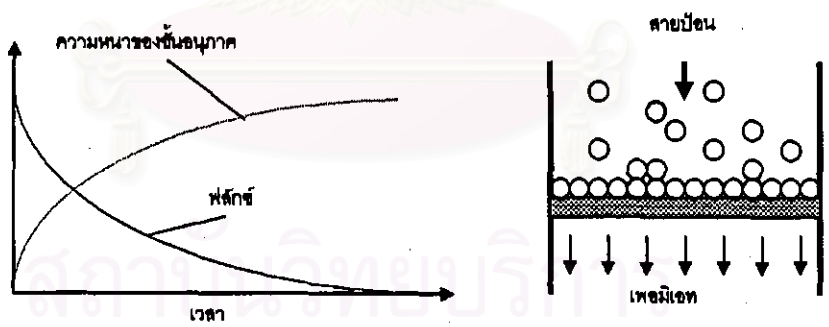
กระบวนการกรองอาศัยเยื่อแผ่นในการเลือกผ่านอนุภาค โดยใช้ความแตกต่างของขนาดหรือน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลาย (solute) หรือสารแขวนลอย (suspension) โดยเยื่อแผ่นจะยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กผ่านไปได้ ส่วนโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกเก็บกักเอาไว้บนผิวเยื่อแผ่น เนื่องจากเยื่อแผ่นมีคุณสมบัติการเลือกผ่าน กระบวนการกรองจะไม่มีการเปลี่ยนเฟสขึ้นภายในระบบ ไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น และอาศัยความดันคร่อมเยื่อแผ่นที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดแรงขับ (driving force) เมื่อป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบ สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถผ่านรูพรุน (pore) ไปได้ เรียกว่า เพอมิเอท (permeate) ส่วนสารที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นบางส่วนจะถูกเก็บกักไว้บนเยื่อแผ่น บางส่วนที่ไม่ผ่านการกรองซึ่งอยู่ด้านเดียวกับสายป้อนเรียกว่า รีเทนเตท (retentate) หรือ คอนเซนเทรต (concentrate) การนำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นส่วนรีเทนเตทหรือเพอมิเอทหรือทั้งสองส่วน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หลักการของกระบวนการกรอง

3.2 **<u>รูปแบบการกรอง</u>** แบ่งได้เป็น 2 แบบ ตามลักษณะการไหลของสายป้อน คือ

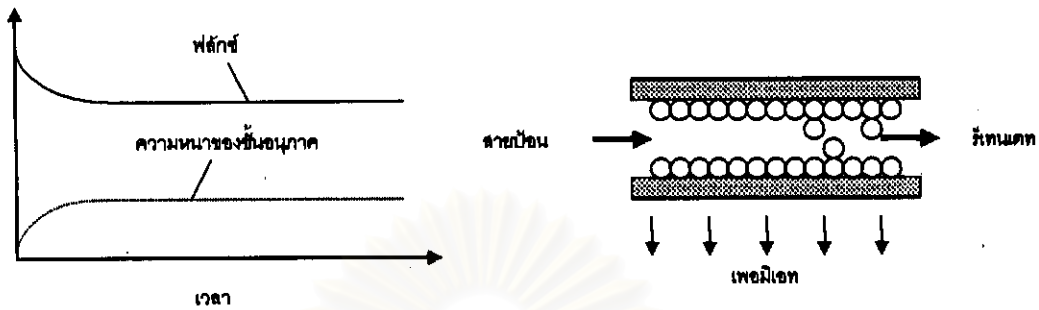
3.2.1 การกรองแบบไหลผ่าน (*Dead end filtration*) เป็นการกรองแบบเก่าที่มีสมรรถนะต่ำ เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไป จะเกิดการอุดตันเนื่องจากความหนาของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นเพิ่มสูงขึ้นจนการกรองไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีกต่อไป ทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากต้องหยุดการดำเนินการ เพื่อถอดเยื่อแผ่นออกมาทำความสะอาดบ่อยครั้ง อัตราการกรองต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่นหรือฟลักซ์ (flux) จะมีค่าลดต่ำลงจนเป็นศูนย์ เนื่องจากการสะสมของอนุภาค (cake) หนาขึ้นจนสารละลายไม่สามารถไหลผ่านไปได้



รูปที่ 3.3 กระบวนการกรองแบบไหลผ่าน

3.2.2 การกรองแบบไหลขนาน (Cross-flow filtration) เป็นระบบที่พัฒนามาจากแบบแรกให้มีสมรรถนะสูงขึ้น โดยสายป้อนซึ่งไหลขนานกับเยื่อแผ่นจะช่วยเพิ่มแรงเฉือน (shear force) ให้กับอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้ชั้นสะสมของอนุภาคบางลง เนื่องจากอนุภาคที่สะสมบนผิวเยื่อแผ่นหลุดออกมาผสมกับสายป้อน อัตราการกรองจึงมากขึ้นและสามารถปฏิบัติการได้อย่าง

ต่อเนื่องในระยะเวลานานโดยปราศจากการอุดตัน หากมีการควบคุมที่สภาวะเหมาะสม จะมีฟลักซ์ของการกรองคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4)



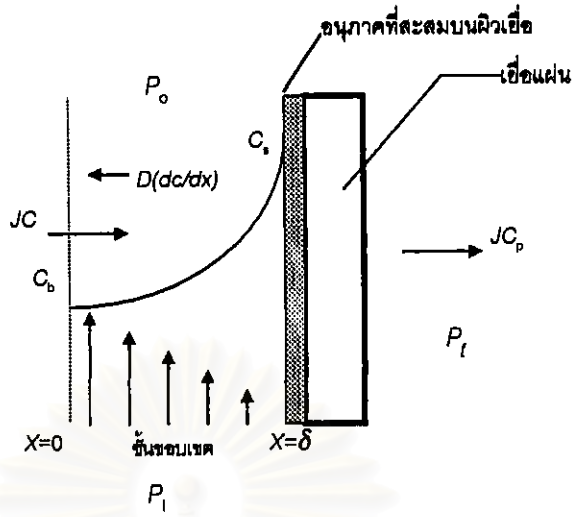
รูปที่ 3.4 กระบวนการกรองแบบไหลขนาน

3.3 การกรองระดับอนุภาคแบบไหลขนาน (Cross-flow microfiltration)

การกรองระดับอนุภาค คือ กระบวนการกรองที่สามารถเก็บกักสารที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1-10 ไมโครเมตรได้ ขึ้นกับขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นที่เลือกใช้ วิธีการบอกคุณสมบัติของเยื่อแผ่นนิยมบอกค่าเป็นฟลักซ์และค่าความสามารถในการเลือกผ่าน (Molecular Weight Cut Off; MWCO) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการกักเก็บอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลตามที่กำหนดหรือใหญ่กว่า ได้มากกว่า 90% ขึ้นไป แต่ความสามารถในการกักเก็บสารยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น ชนิด, รูปร่างของอนุภาคที่ต้องการแยก, แรงกระทำระหว่างอนุภาคกับเยื่อแผ่น ตลอดจนสภาพระหว่างการดำเนินงาน เป็นต้น

เมื่อการกรองดำเนินไป สารที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นได้จะถูกสะสมอยู่บนผิวเยื่อแผ่น ทำให้ความเข้มข้นของสารโมเลกุลใหญ่ที่ผิวเยื่อแผ่น (C_g) มีค่าสูงกว่าสายป้อน (C_b) จึงมีการแพร่ (Diffusion) กลับในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการกรอง (รูปที่ 3.5) เนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่าง (concentration difference) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (concentration polarization)

ถ้าหากความเข้มข้นของชั้นอนุภาคที่สะสมมีค่าสูงและมีภาวะเหมาะสมจนทำให้สิ่งกรองเกาะติดกัน (C_g) มีลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณผิวเยื่อแผ่น ซึ่งจะเพิ่มค่าความต้านทานการกรอง ฟลักซ์ของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เจลโพลาไรเซชัน (gel polarization) ภาวะที่ทำให้เกิดชั้นเจลจะขึ้นกับตัวแปรหลายตัว เช่น ความดัน อุณหภูมิ ค่าการละลาย ความเป็นกรดด่าง เป็นต้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น (C_g) ที่มีค่าสูงจนเกิดเป็นชั้นเจลขึ้นนี้จะทำให้อัตราการกรองมีค่าต่ำมาก เนื่องจากชั้นเจลเปรียบเสมือนเยื่อแผ่นชั้นที่สองที่มีค่าความต้านทานการกรองสูงมาก



รูปที่ 3.5 รูปแสดงความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น

3.4 **<u>อิทธิพลที่ส่งผลต่อฟลักซ์การกรอง</u>** ตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อฟลักซ์การกรอง ได้แก่ ความดันคร่อมเยื่อแผ่นและความเข้มข้นของสายป้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 ***ความดันคร่อมเยื่อแผ่น*** ค่าฟลักซ์ของระบบจะแปรผันตรงกับค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่น (transmembrane pressure; ΔP_{TM}) ดังสมการต่อไปนี้

$$J = \Delta P_{TM} / \mu (R_m + R_c + R_p) \quad \text{..... (3.1)}$$

โดย J คือ อัตราการกรองต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่น (มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร-นาที)

R_m คือ ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร$^{-1}$)

R_c คือ ความต้านทานการกรองของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น (เซนติเมตร$^{-1}$)

R_p คือ ความต้านทานการกรองของอนุภาคในรูพรุนของเยื่อแผ่น (เซนติเมตร$^{-1}$)

μ คือ ความหนืดของสายป้อน (กรัมต่อเซนติเมตร-นาที)

โดยค่าความดันคร่อมเยื่อแผ่น สามารถหาได้จากสมการ (3.2) คือ (จากรูปที่ 3.5)

$$\Delta P_{TM} = (P_i + P_o)/2 - P_f \quad \text{..... (3.2)}$$

โดย P_i คือ ความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

P_o คือ ความดัน ณ ตำแหน่งทางออก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

P_f คือ ความดันด้านเพอมิเอท (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

3.4.2 *ความเข้มข้น* จากสมการสมดุลมวล (พิจารณารูปที่ 3.5)

อัตราการพาสู่เยื่อแผ่น - อัตราการแพร่กลับ - อัตราการผ่านออกจากเยื่อแผ่น = 0

หรือสามารถเขียนได้ว่า

$$JC - D\,dC/dX - JC_p = 0 \quad \text{..... (3.3)}$$

โดย C คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวของเยื่อแผ่น ณ ตำแหน่งใดๆ (กรัมต่อลิตร)

C_p คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านเพอมิเอท (กรัมต่อลิตร)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคแขวนลอย (ตารางเซนติเมตรต่อนาที)

ถ้าความเข้มข้นของสารแขวนลอยด้านเพอมิเอทมีค่าน้อยมาก ($C_p = 0$) และอินทิเกรทที่สภาวะขอบเขต คือ $X = 0$, $C = C_b$ และ $X = \delta$, $C = C_s$ จากสมการ (3.3) จะได้

$$J = D/\delta \ln (C_s/C_b) \quad \text{..... (3.4)}$$

โดย C_b คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยด้านสายป้อน (กรัมต่อลิตร)

C_s คือ ความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยที่ผิวของเยื่อแผ่น (กรัมต่อลิตร)

δ คือ ความหนาของชั้นขอบเขต (เซนติเมตร)

ถ้ากำหนดให้ k = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย = D/δ

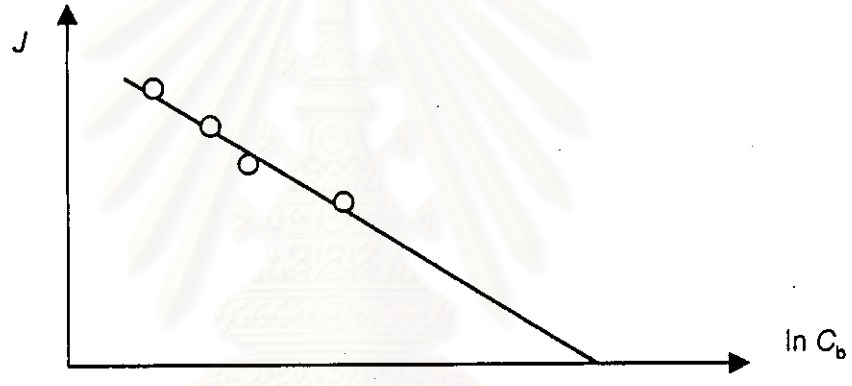
$$J = k \ln (C_s/C_b) \quad \text{..... (3.5)}$$

สำหรับสภาวะที่สารแขวนลอยเกิดเจล (นั่นคือ $C_g=C_g$) จะได้

$$J = k \ln (C_g/C_b) \quad \text{.....(3.6)}$$

k และ C_g สามารถคำนวณได้จากการทดลอง ที่ค่าความเข้มข้นของยนุภาคแขวนลอยด้านสายป้อน (C_b) ต่างๆ ซึ่งจะได้ค่าฟลักซ์การกรอง (J) ต่างกัน เมื่อนำผลการทดลองมาสร้างกราฟดังรูปที่ 3.6 จะได้ค่า $-k$ เท่ากับค่าความชัน และได้ค่า C_g จากจุดตัดแกน y จากการกระจายสมการ (3.6) ดังนี้

$$J = k \ln C_g - k \ln C_b \quad \text{.....(3.7)}$$



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของความเข้มข้นกับฟลักซ์

3.5 ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น

ความสามารถในการเก็บกักของเยื่อแผ่น (Rejection) เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเก็บกักอนุภาคของเยื่อแผ่น สามารถแสดงได้โดยสมการต่อไปนี้

$$\sigma = 1 - (C_p/C_b) \quad \text{..... (3.8)}$$

โดย σ คือ สัมประสิทธิ์ในการเก็บกักของเยื่อแผ่น

ถ้าเยื่อแผ่นมีความสามารถในการเก็บกักสูง ค่าความเข้มข้นด้านเพอมิเอทจะมีค่าใกล้ศูนย์ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ในการเก็บกักจะมีค่าใกล้ 1 ในทางตรงข้าม เยื่อแผ่นที่มีความสามารถในการเก็บกักต่ำ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการเก็บกักเข้าใกล้ศูนย์

3.6 **เครื่องกรองระดับอนุภาค** มีหลายแบบที่นิยมได้แก่

1. แบบแผ่น (Plate and frame module) ประกอบด้วยเยื่อแผ่นหลายๆ แผ่นวางซ้อนกัน โดยใช้แผ่นรอง (spacer) คั่นกลางระหว่างชั้น เพื่อช่วยการกระจายตัวของสายป้อนให้เคลื่อนที่ทั่วทั้งเยื่อแผ่นและมีแผ่นรองรับ (supported plate) เพื่อให้เยื่อแผ่นสามารถปฏิบัติงานที่ความดันสูงได้

2. แบบท่อม้วน (Spiral Wound module) อุปกรณ์จะประกอบด้วยแผ่นรอง, เยื่อแผ่น, แผ่นรวบรวมเพอมิเอท (Permeate Collector) และแผ่นกั้นระหว่างชั้น (Covering) วางซ้อนกันและม้วนเข้าหาแกนท่อซึ่งเจาะรูเพื่อรับเพอมิเอท สารละลายจะถูกป้อนภายใต้ความดันผ่านเข้าทางแผ่นรองซึ่งอยู่ติดกับเยื่อแผ่น ส่วนที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นจะถูกรวบรวมไปยังแกนกลางท่อ โดยแต่ละส่วนจะไม่ผสมกันเนื่องจากมีแผ่นกั้นระหว่างชั้น ส่วนรีเทนเตทจะไหลออกอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์

3. แบบท่อ (Tubular module) เยื่อแผ่นที่ใช้ในอุปกรณ์ชนิดนี้นิยมขึ้นรูปจากเซรามิกส์ ส่วนมากภายในจะประกอบด้วยท่อหลายๆท่อมารวมกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการกรอง จึงต้องมีการป้องกันการรั่วไหลอย่างดี

4. แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber module) เยื่อแผ่นชนิดนี้จะผลิตจากพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กจำนวนมากมัดรวมกัน

การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับการกระบวนการกรองระดับอนุภาค ต้องพิจารณาถึงปัจจัยร่วมหลายอย่างประกอบกันในการตัดสินใจเลือก เช่น ความเหมาะสมกับลักษณะของสารละลายที่ใช้กรอง, ความดันที่ใช้ดำเนินการ, การบำรุงรักษาและการทำความสะอาด เป็นต้น

หากพิจารณาข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของอุปกรณ์แต่ละชนิดจากตารางที่ 3.2 พบว่าแบบที่เหมาะสมสำหรับที่จะนำมาใช้ในการทำงานวิจัยนี้คือ การกรองแบบแผ่น เนื่องจากข้อเสียของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ มีจุดอับมาก ทำให้ต้องทำความสะอาดเยื่อแผ่นบ่อย การใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อกำจัดอนุภาคที่สะสมบนเยื่อแผ่นจะช่วยให้การกรองดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงการติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงทำได้ง่าย เพราะเป็นแผ่นเรียบ ในขั้นตอนการสร้างจึงสามารถออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับเยื่อแผ่นตามต้องการได้สะดวก ส่วนอุปกรณ์ชนิดอื่นมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก การติดตั้งตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะทำได้ค่อนข้างยาก

ตารางที่ 3.2 ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องกรองแต่ละชนิด

ชนิดของอุปกรณ์	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบแผ่น	ออกแบบง่าย , มีพื้นที่การกรองต่อปริมาตรสูง	มีจุดอับมาก , ต้องทำการล้างและเปลี่ยนเยื่อแผ่นบ่อย
แบบท่อม้วน	มีพื้นที่การกรองต่อปริมาตรสูง, ใช้ความดันต่ำ	อุดตันง่าย , ทำความสะอาดยาก, สารกรองต้องมีปริมาณมาก
แบบท่อ	ง่ายต่อการซ่อมแซมและทำความสะอาด , ทนทานต่อสารเคมีและดำเนินการที่ความดันสูงได้	ราคาสูง , มีพื้นที่การกรองต่อปริมาตรต่ำ , สารกรองต้องมีปริมาณมาก
แบบเส้นใยกลวง	มีพื้นที่การกรองต่อปริมาตรสูงมาก, กรองสารปริมาณน้อยได้	อุดตันง่าย , ไม่สามารถดำเนินการที่ความดันสูงได้ , ทำความสะอาดยากหรือต้องเปลี่ยนทั้งชุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย